

河北阜平杂岩中阜平岩群浅粒岩锆石 U-Pb-Hf 同位素特征及其地质意义

王建龙¹, 宋会侠¹, 段庆松¹, 黄智强¹, 程海峰², 杨崇辉¹, 耿元生¹, 杜利林¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 河北省区域地质调查院, 河北 廊坊 065000)

摘要: 华北克拉通中部阜平地区的阜平岩群是该区分布较广的太古宙地层, 经历了角闪岩相-麻粒岩相变质, 其时代限定对研究阜平杂岩的早期演化过程具有重要意义。本文利用 LA-MC-ICP-MS (多接收激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪) 对阜平岩群元坊岩组中的浅粒岩进行了锆石 U-Pb-Hf 同位素原位分析, 获得两期变质锆石年龄分别为 $2\,531 \pm 15$ Ma 和 $1\,943 \pm 16$ Ma, 并根据碎屑锆石内部结构特征和年龄结果, 认为核部年龄在 $2\,549 \sim 2\,500$ Ma 的碎屑锆石中最大 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 $2\,549 \pm 4$ Ma 可以代表原岩的最大沉积年龄, 初步限定元坊岩组浅粒岩原岩沉积时代为 $2\,550 \sim 2\,530$ Ma。锆石 Lu-Hf 同位素结果中, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.000\,289 \sim 0.004\,262$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.281\,255 \sim 0.281\,791$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ 值为 $0.281\,230 \sim 0.281\,623$, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-5.86 \sim 13.62$, 变化范围较大。单阶段和两阶段模式年龄分别为 $2\,748 \sim 2\,242$ Ma 和 $2\,810 \sim 2\,272$ Ma。根据锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素结果, 提出元坊岩组浅粒岩物源区主要来自新太古代 TTG 质片麻岩, $2.8 \sim 2.6$ Ga 为阜平地区强烈的地壳生长阶段, 阜平地区 2.5 Ga 和 1.95 Ga 变质信息分别代表华北初步克拉通化和最终克拉通化过程中的变质作用。

关键词: 阜平岩群; 元坊岩组; 浅粒岩; 锆石 U-Pb-Hf 同位素

中图分类号: P588.3; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)03-0267-16

Zircon U-Pb-Hf isotopic characteristics of leptyte in the Fuping Group, Hebei Province, and its geological significance

WANG Jian-long¹, SONG Hui-xia¹, DUAN Qing-song¹, HUANG Zhi-qiang¹, CHENG Hai-feng²,
YANG Chong-hui¹, GENG Yuan-sheng¹ and DU Li-lin¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Institute of Regional Geological Survey of Hebei Province, Langfang 065000, China)

Abstract: The Fuping Group, which has undergone amphibolite to granulite facies metamorphism, is the most widely distributed Archean strata in Fuping area of the Central North China Craton. The age of the Group is vital for probing the evolutionary history of the Fuping Complex. In this paper, LA-MC-ICP-MS (laser ablation multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry) was used to analyze the zircon U-Pb-Hf isotope of leptyte in the Yuanfang Formation of the Fuping Group. The authors obtained two metamorphic zircon ages of $2\,531 \pm 15$ Ma and $1\,943 \pm 16$ Ma, respectively. Based on the internal structure of zircons and U-Pb ages, the authors chose the $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age of $2\,549 \pm 4$ Ma from the $2\,549$ Ma to $2\,500$ Ma detrital zircon domains as the maximal depositional age and confirmed the Yuanfang Formation between $2\,550$ Ma and $2\,530$ Ma. The zircon Lu-Hf isotopic analyses

收稿日期: 2019-10-22; 接受日期: 2020-03-24; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41772191, 41572175, 41172171); 中国地质调查局资助项目(DD20190003, DD20160121-04)

作者简介: 王建龙(1993-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 939269897@qq.com; 通讯作者: 杜利林(1973-), 男, 研究员, 主要从事前寒武纪地质研究, E-mail: dulilin7310@cags.ac.cn.

demonstrate that $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ and $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ are $0.000\,289 \sim 0.004\,262$ and $0.281\,255 \sim 0.281\,791$, respectively with $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ and $\varepsilon\text{Hf}(t)$ range being $0.281\,230 \sim 0.281\,623$ and $-5.86 \sim 13.62$. The single-stage and two-stage model ages are in the range of $2\,748 \sim 2\,242$ Ma and $2\,810 \sim 2\,272$ Ma, respectively. On such a basis, the authors infer that the source of the Yuanfang Formation was mainly from Neoproterozoic TTG gneisses in the Fuping Complex, and the intensive crustal growth in the Complex was concentrated from 2.8 Ga to 2.6 Ga. In addition, the authors infer that metamorphic ages of 2.5 Ga and 1.95 Ga may represent metamorphic events related to the initial and final cratonization of the North China Craton.

Key words: Fuping Group; Yuanfang Formation; leptyte; zircon U-Pb-Hf isotopes

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41772191, 41572175, 41172171); China Geological Survey Project(DD20190003, DD20160121-04)

华北克拉通作为世界上最为古老的克拉通之一,经历了漫长而复杂的地质演化过程,几乎记录了前寒武纪所有阶段的全球重大地质事件(Zhao and Cawood, 2012; 翟明国, 2013)。而地层作为地质演化过程的时间载体,往往能对构造事件的时间格架起到重要的约束作用(杨崇辉等, 2018)。阜平杂岩是研究华北克拉通演化的经典地区,发育了较为齐全的太古宙-古元古代地质单元(程裕淇等, 2004),前人对其早期的演化历史存在不同的认识(Guan *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2002; 杨崇辉等, 2004; Ren *et al.*, 2013):部分学者认为阜平杂岩中的表壳岩仅为古元古代湾子岩系,该套杂岩也只经历了古元古代晚期的造山过程,发育广泛的1.85~1.80 Ga的变质作用(Guan *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2002);而部分学者认为阜平杂岩包含新太古代阜平岩群和古元古代湾子群两套表壳岩,阜平杂岩经历了~2.5 Ga和1.8 Ga两期变质过程(程裕淇等, 2004; 杨崇辉等, 2004, 2015)。因此,对阜平地区出露的太古宙阜平岩群的形成时代限定显得十分重要。然而,华北的早前寒武纪地层经历了多期构造事件的影响,其中矿物组合、结构和构造都遭受强烈的变质作用改造,其年代学的研究往往变得更加困难。由于锆石具有十分稳定的晶体结构(Finch and Hanchar, 2003),其U-Pb同位素体系封闭温度远高于其他副矿物(Cherniak and Watson, 2003)。因此,锆石U-Pb定年在前寒武纪地质年代学研究中被广泛应用。沉积岩中的碎屑锆石可以间接对地层时代进行限定,并已得到较广泛的应用(万渝生等, 2003; Fedo *et al.*, 2003; 杜利林等, 2011)。前人已对阜平杂岩中的片麻岩进行了大量的同位素年代学和地球化学研究(Guan *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2004; Han *et al.*, 2012; 路增龙

等, 2014),但对其中变质表壳岩的研究程度相对较低(程裕淇等, 2004; 杨崇辉等, 2015)。阜平岩群作为阜平杂岩中重要的地质单元之一,其形成时代及变质作用过程对探讨阜平杂岩及华北克拉通中部早前寒武纪地质演化具有重要意义。程裕淇等(2004)在综合1:5万填图资料和专题研究基础上,将阜平杂岩中的变质表壳岩划分为阜平岩群、湾子群和麻河清岩组,其中阜平岩群的岩石组合可进一步划分为索家庄岩组和元坊岩组,岩石类型为黑云/角闪斜长片麻岩、二辉斜长麻粒岩、透辉变粒岩、斜长角闪岩、浅粒岩、大理岩和紫苏磁铁石英岩。阜平岩群的原岩组合为碎屑沉积岩夹少量中-基性火山岩(程裕淇等, 2004)。索家庄岩组中副片麻岩变质碎屑锆石SHRIMP年代学资料初步限定其时代为2700~2538 Ma;元坊岩组推断与索家庄岩组时代相当,但还缺乏新的年龄资料约束(程裕淇等, 2004; 杨崇辉等, 2015)。因此,本文选取阜平岩群元坊岩组中含白云母钾长浅粒岩进行锆石U-Pb定年和Lu-Hf同位素分析,拟对阜平岩群的沉积时代做进一步限定。在此基础上,对阜平地区新太古代地壳生长特征和变质时代的意义进行了初步讨论。

1 地质背景

阜平杂岩位于华北克拉通中部造山带中段(图1a; Zhao *et al.*, 2005),区内出露有太古宙至古元古代地层和深成片麻岩类。根据岩石组合特征,阜平杂岩被划分为阜平片麻岩、湾子岩系、南营花岗质片麻岩和龙泉关眼球状片麻岩(刘树文, 1997; 刘树文等, 2000)。程裕淇等(2004)通过对阜平杂岩进一步研究,将阜平杂岩内变质表壳岩和变质深成岩进行了详细的划分,本文区域地质资料主要采用该划

分方案。

根据阜平地区变质深成岩的岩石组合、相互间地质关系、变质变形特征和同位素年龄结果将区域内变质深成岩划分为新太古代阜平旋回、湾子旋回及古元古代吕梁旋回3个岩浆演化阶段(程裕淇等, 2004)。阜平旋回变质深成岩主体由深熔作用强烈的TTG(tonalite trondjemite granodiorite)质片麻岩组成,包括大石峪片麻岩、坊里片麻岩、东庄片麻岩。它们遭受了强烈的中深层次构造变形,并经历了至少两期混合岩化作用,变质程度达高角闪岩相-麻粒岩相(程裕淇等, 2004)。TTG质片麻岩的形成时代为2 540~2 490 Ma(Zhao *et al.*, 2002; 程裕淇等, 2004; 杨崇辉等, 2004)。此外,后续研究在阜平地区不断发现新太古代早期~2.7 Ga的英云闪长质片麻岩(Guan *et al.*, 2002; Han *et al.*, 2012; 路增龙等, 2014)。湾子旋回变质深成岩主要包括杨家庄片麻岩、南甸花岗岩、茹家庄花岗岩和老人坪片麻岩等变质侵入体(典型的I型花岗岩),与地壳深熔作用有关的平阳花岗岩和三条占基性岩墙,代表了一个构造岩浆旋回从早期到晚期不同发展阶段形成的不同成因类型的产物。岩体变形以发育片麻理为主要特点,变质程度达角闪岩相(程裕淇等, 2004)。吕梁旋回变质侵入岩包括杨木桥超基性岩、白羊岭花岗岩、上庄花岗岩及扣子头辉绿岩墙(程裕淇等, 2004)。此外,还应包括南营片麻岩和岗南片麻岩,锆石U-Pb年代学研究将其时代限定为2 082~2 024 Ma(孙敏等, 2001; Guan *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2020)。该旋回的变质侵入岩基本保留侵入岩面貌,变质程度低,变形较弱,局部与围岩侵入接触关系清楚。

阜平杂岩内的变质表壳岩主要包括新太古代阜平岩群、古元古代湾子群以及分布于龙泉关构造杂岩带内的新太古代麻河清岩组(图1b; 程裕淇等, 2004; 杨崇辉等, 2015, 2018)。阜平岩群根据岩石组合的不同,被划分为索家庄岩组与元坊岩组,索家庄岩组中下部主要为黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、石榴角闪二辉麻粒岩、二辉斜长麻粒岩、斜长角闪岩、浅粒岩等;其上部是标志层组合,为斜长角闪岩夹透辉石岩、透辉斜长变粒岩和杂色大理岩。该岩组经历了麻粒岩相变质,混合岩化强烈,形成条带状、条纹状混合岩化岩石(程裕淇等, 2004)。程

裕淇等(2004)和杨崇辉等(2015)通过SHRIMP锆石测年将索家庄岩组的时代限定为2.7~2.54Ga,并发现其经历了新太古代末期和元古代晚期两期变质改造。元坊岩组底部为薄层浅粒岩,并以其作为与索家庄岩组的分界,在空间上可相变为黑云斜长片麻岩。岩组下部以黑云斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩为主,夹薄层斜长变粒岩、二长变粒岩等,浅粒岩与片麻岩之间可见相变关系(程裕淇等, 2004)。岩组上部为中细粒黑云斜长片麻岩、角闪黑云斜长片麻岩夹浅粒岩、斜长角闪岩(程裕淇等, 2004)。该套岩石中仅获得斜长角闪岩Sm-Nd等时线年龄为2 791 Ma和2 560 Ma。程裕淇等(2004)认为元坊岩组与索家庄岩组形成时代基本相同,并经历了两期变质作用叠加。然而元坊岩组的形成时代尚缺乏准确的年代学资料约束。湾子群是一套沉积特征明显的表壳岩,区域变质特征明显不同于阜平岩群,为角闪岩相变质,部分地段韧性变形叠加后退变为低角闪岩相(程裕淇等, 2004)。湾子群下段主要为厚层钾长浅粒岩及磁铁矿浅粒岩、中薄层二长浅粒岩、条带状钾长浅粒岩等,上段以大理岩、钙硅酸盐岩为主(程裕淇等, 2004)。近年来,对湾子群的形成时代研究较多,基本认为其形成于古元古代(吴昌华等, 2000; Guan *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2002; 李基宏等, 2005; Ren *et al.*, 2013; Tang *et al.*, 2016)。但具体时代还存在不同的认识:Guan等(2002)从湾子群获得细粒片麻岩的锆石U-Pb年龄结果为 $2\,097 \pm 46$ Ma,认为代表变质酸性火山岩的年龄,提出湾子群时代为~2.1 Ga。Tang等(2016)在湾子群的钙硅酸盐岩中获得最年轻碎屑锆石年龄为 $1\,950 \pm 20$ Ma,同时结合其中变质锆石年龄~1.9 Ga,认为湾子群代表1.95~1.9 Ga的弧前盆地沉积组合;而李基宏等(2005)及Ren等(2013)获得湾子群中主体碎屑锆石为2.5 Ga,部分锆石边部增生部分的年龄结果为2.1 Ga,限定湾子群的时代为2.5~2.1 Ga;其后杨崇辉等(2018)根据湾子群石英岩碎屑锆石年龄及区域地质关系研究进一步限定湾子群底界年龄在2.2 Ga。麻河清岩组属于龙泉关构造杂岩带内一套经历了多期变质变形的变质杂岩,主要由一些浅粒岩及变粒岩组成,分布于龙泉关-两界峰-闫家庄一带,其时代认为属新太古代(图1b; 程裕淇等, 2004)。

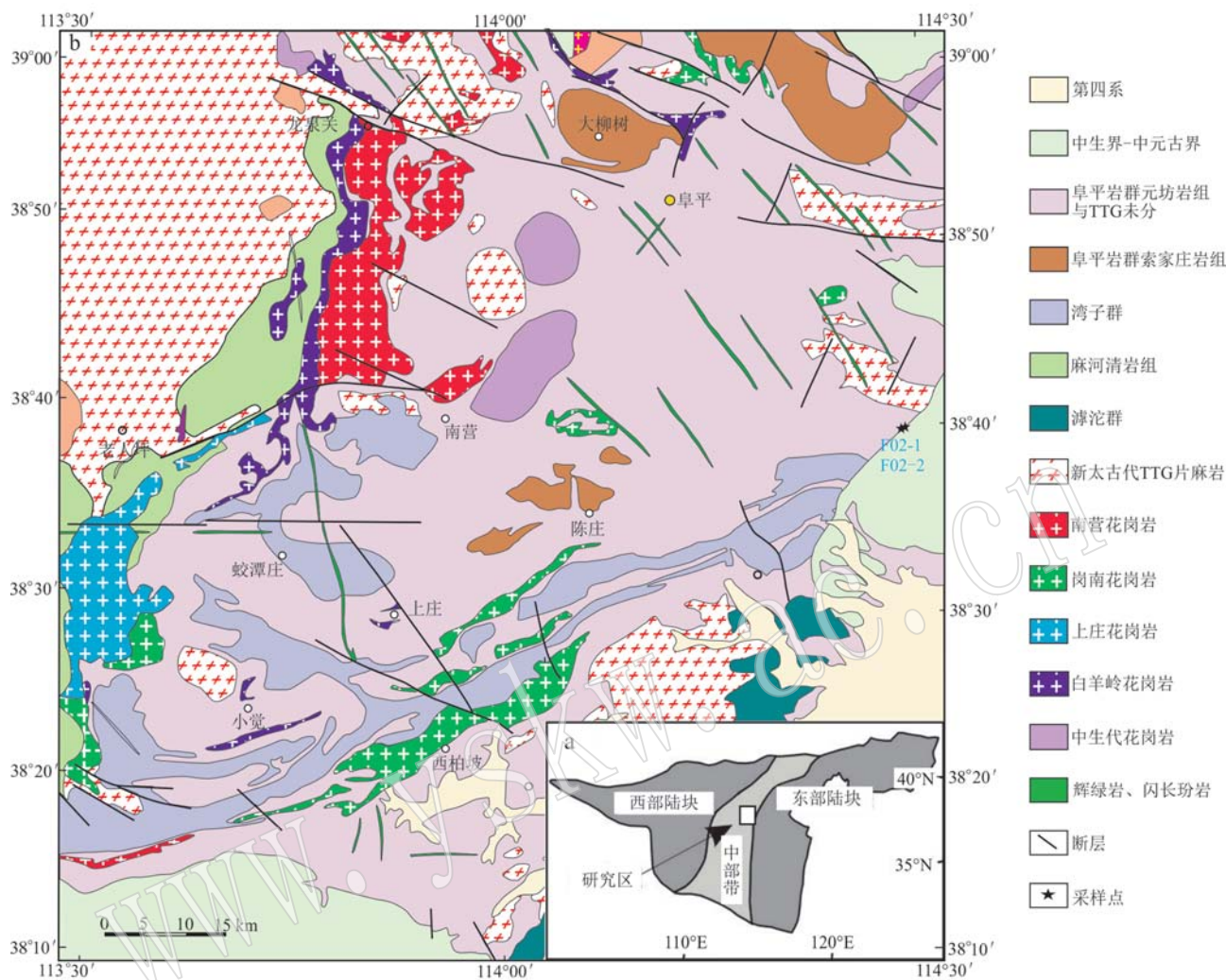


图1 阜平杂岩地质简图[据程裕淇等(2004)修改]

Fig. 1 Geological sketch map of the Fuping Complex(modified after Cheng Yuqi *et al.*, 2004)

2 野外地质与岩石学特征

研究区内阜平岩群元坊岩组广泛分布于小觉、天井、木盘、西柏坡、孟家庄、刘家坪、王家湾、城南庄、叠卜安、猴石顶等地(程裕淇等,2004)。本文研究的钾长浅粒岩样品(F02-1、F02-2)采自于行唐县团山村西南S241省道公路旁(GPS: 38°38.379'N, 114°27.386'E; 图1b)。野外露头呈灰白色、浅黄褐色,块状构造、部分发育弱片麻状构造,中细粒粒状变晶结构(图2a)。两个样品宏观特征基本相同,差别仅表现为白云母含量不同和磁铁矿的有无。样品矿物组成为:石英(55%~60%),钾长石(25%~30%),白云母(5%~8%),含少量的磁铁矿(图

2b),副矿物主要为锆石。石英显微镜下颗粒小于0.2 mm,他形粒状,部分呈圆粒状包含于钾长石内,粒度较大者与长石呈现镶嵌结构,可见波状消光。钾长石多为微斜长石,粒度大小多为0.5~1.5 mm,发育格子双晶,与石英镶嵌呈现不规则状形态(图2b)。单偏光镜下,白云母无色,粒度为0.2~0.4 mm,多分布于长英质矿物之间(图2b)。样品F02-1中可见少量磁铁矿,呈自形粒状,粒径0.25~1.5 mm,部分包裹于石英颗粒之中,部分分布于钾长石、石英颗粒之间,磁铁矿可能为后期深熔作用成因(任留东等,2009)。根据矿物组合特征,以上两个样品为含白云母钾长浅粒岩。本次研究选取样品F02-2进行了详细的锆石U-Pb和Lu-Hf同位素研究,并对两个样品进行了岩石地球化学分析。以期对阜平岩

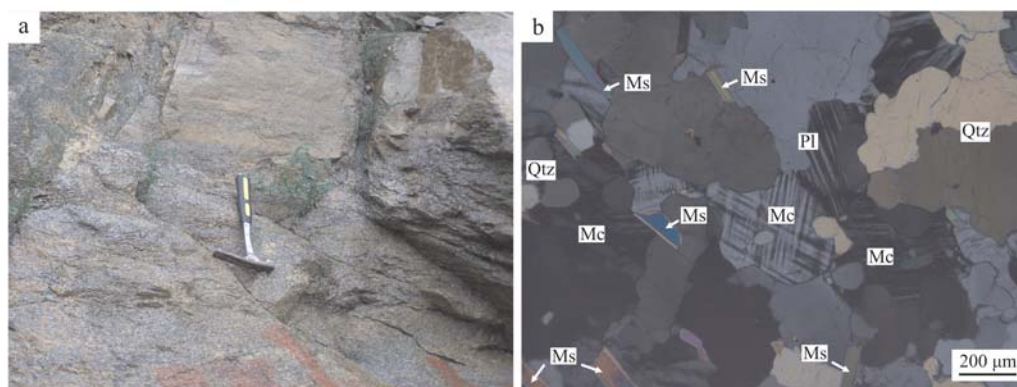


图2 元坊岩组浅粒岩野外及显微镜下照片(矿物缩写据沈其韩, 2009)

Fig. 2 Outcrop and microphotographs of leptyte in the Yuanfang Formation of the Fuping Group (mineral abbreviation after Shen Qihan, 2009)

群元坊岩组的沉积时代进行限定。

3 分析方法

样品 F02-1 及 F02-2 的全岩粉末样品制备在河北省区域地质调查院完成。选取 300~500 g 岩石样品, 去掉风化面后, 选取新鲜部分用颚式破碎机破碎, 然后用粉碎机样品碎块粉碎至 200 目以下, 后从中取 50~100 g 进行全岩化学分析。全岩主、微量元素分析在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成。主量元素用 X 荧光光谱仪(XRF, Rigaku-2100)测定, 分析误差 <0.5%。微量元素测试采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS, Thermo X-series), 分析误差 <5%。

样品 F02-2 的锆石单矿物分选在河北省区域地质调查院完成。LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定在中国地质科学院矿产与资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成, 具体仪器参数和分析流程详见文献(侯可军等, 2009)。锆石 U-Pb 同位素测试过程中, 以标准锆石 GJ-1(年龄: 600 Ma; Kang *et al.*, 2004)作为外标进行年龄校正, 以标准锆石 M127 为外标校正 U、Th 含量($U: 923 \times 10^{-6}$, $Th: 439 \times 10^{-6}$, $Th/U: 0.48$; Nasdala *et al.*, 2008)。测试过程中, 每测定 10 个样品后连续测定 2 个锆石 GJ-1 标样, 并测定一个锆石 Plesovice 标样。具体数据处理用 ICPMSData-Cal 程序(Liu *et al.*, 2010)。测试结果中, 绝大多数分析点 $^{206}Pb/^{204}Pb > 1\ 000$, 而对于 ^{204}Pb 含量异常高的分析点, 考虑可能受包体或裂隙中普通 Pb 的影响, 在数据处理过程予以剔除。锆石 U-Pb 年龄谱和

图和年龄结果计算采用 Isoplot 程序(Ludwig, 2003)。

样品 F02-2 锆石 Lu-Hf 同位素分析在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成, 详细实验流程参见侯可军等(2009)。分析过程中, 激光束斑直径为 44 μm , 信号采集时间为 26.2 s。为消除 ^{176}Lu 和 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的质量干扰, 利用 $^{176}Lu/^{175}Lu = 0.026\ 58$ 和 $^{176}Yb/^{172}Yb = 0.588\ 7$ (Chu *et al.*, 2002)进行质量干扰校正; 同时, 利用 $^{179}Hf/^{177}Hf = 0.732\ 5$ 和 $^{173}Yb/^{172}Yb = 1.352\ 74$ 分别对 Lu 和 Yb 同位素比值进行数值归一化质量歧视校正(吴福元等, 2007; 侯可军等, 2009)。实验过程中, GJ-1 作为参考标准锆石, 23 个 GJ-1 标准锆石的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 平均值为 $0.282\ 013 \pm 8$ (MSWD = 1.3), 与 Elhlou 等(2006)分析结果($0.282\ 013 \pm 19$)在误差范围内一致。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

样品 F02-2 中锆石主要呈半自形短柱状、他形粒状, 粒度多为 150~250 μm , 延长系数为 1:1.2~1:1.5。在阴极发光图中(图3), 锆石多具有核边结构, 部分锆石核部可见较清晰的岩浆韵律环带, 而部分锆石核部无明显结构。锆石增生边基本围绕核部生长, 无明显的内部结构特征, 一些锆石边部明显切割核部环带或熔蚀了锆石核部; 部分锆石核、边之间还出现高亮度的幔部。选择了 28 粒锆石共完成了 47 个测点的 U-Pb 同位素分析, 其中 31 个分析点位于锆石核部, 其他 16 个点位于变质增生边部。锆石

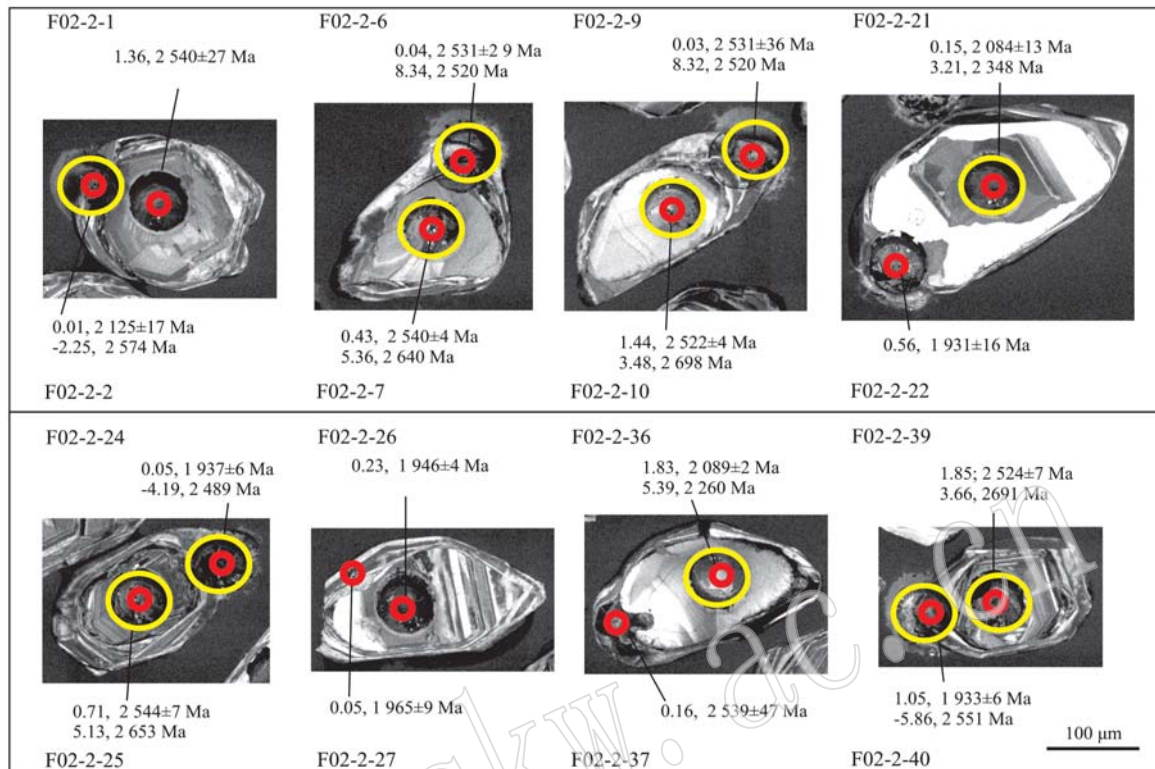


图3 元坊岩组浅粒岩锆石 CL 图像[红色、黄色圆圈分别为 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素分析点位置,分析点注释为 Th/U 值、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄、 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值和 t_{DM1} 值]

Fig. 3 Representative zircons CL images of leptyte in the Yuanfang Formation of the Fuping Group (The red and yellow circles are U-Pb and Lu-Hf isotope analysis points, and the annotations beside are Th/U, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages, $\epsilon\text{Hf}(t)$ and t_{DM1})

U、Th 含量分别为 $4 \times 10^{-6} \sim 469 \times 10^{-6}$ 和 $1 \times 10^{-6} \sim 427 \times 10^{-6}$ (表 1)。根据 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄和锆石分析点的位置,在核部锆石年龄结果中,5 和 42 号点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 2610 ± 7 Ma 和 2749 ± 24 Ma,另外,14、17、21、22、26、36 和 45 号点可能获得了混合年龄,年龄结果为 $2394 \sim 1931$ Ma,其余年龄位于 $2549 \sim 2500$ Ma 之间,并获得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 上交点年龄为 2527 ± 10 Ma (图 4)。利用位于谐和线上或附近(年龄谐和图大于 90%)的 22 个点获得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2526 ± 7 Ma (图 4)。16 个锆石变质边部分析点中,其 Th/U 值多小于 0.1,具有典型变质成因锆石特征 (Hoskin and Black, 2000)。但在锆石 U-Pb 年龄谐和图中,都表现出强烈的 Pb 丢失 (图 4)。根据 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄可以分为两组:一组变质年龄集中于 ~ 2.5 Ga,其 U、Th 含量为 $189 \times 10^{-6} \sim 469 \times 10^{-6}$ 、 $7 \times 10^{-6} \sim 75 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 $0.02 \sim 0.16$,11 个分析点获得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2531 ± 15 Ma;另一组集中于 ~ 1.9

Ga, U、Th 含量为 $68 \times 10^{-6} \sim 141 \times 10^{-6}$ 、 $3 \times 10^{-6} \sim 129 \times 10^{-6}$,除 40 号分析点 Th/U 值为 1.05 外,其余 3 个点的 Th/U 值为 $0.02 \sim 0.05$,4 个点获得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 1943 ± 16 Ma (图 4)。

4.2 Lu-Hf 同位素

对已完成锆石 U-Pb 同位素分析的 42 个点进行了原位 Lu-Hf 同位素测试,结果见表 2。 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.000289 \sim 0.004262$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.281255 \sim 0.281791$ 。观察到 ~ 2.5 Ga 和 ~ 1.95 Ga 锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄铅丢失下交点在原点附近,具有自然 Pb 丢失特征 (Amelin *et al.*, 2000),因此利用每个锆石测点原位年龄进行计算。计算后获得 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ 值为 $0.281230 \sim 0.281623$, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-5.86 \sim 13.62$ 。 2.5 Ga 变质锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ 加权平均值为 0.281398 ± 0.000027 ($N=10$, MSWD = 8.3), 1.9 Ga 变质锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ 加权平均值为 0.281416 ± 0.000062 ($N=3$, MSWD = 3.2);单阶段和两阶段模式年龄分别为 $2242 \sim 2748$ Ma 和 $2272 \sim$

表 1 阜平岩群浅粒岩 (F02-2) 锆石 U-Pb 同位素测试结果

Table 1 Zircon U-Pb isotopic analyses of leptyte (F02-2) in the Yuanfang Formation of the Fuping Group

样点号	$w_B/\%$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度/%				
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ							
F02-2-1C	89	65	1.36	0.168 19	0.000 55	10.120 10	0.227 91	0.436 18	0.009 42	2 540	27	2 334	42	2 446	21	95
F02-2-2R	3	217	0.01	0.132 03	0.001 22	3.829 35	0.039 00	0.211 26	0.002 18	2 125	17	1 236	12	1 599	8	74
F02-2-3C	36	42	0.87	0.166 10	0.000 34	10.386 77	0.106 37	0.453 42	0.004 52	2 520	3	2 410	20	2 470	9	97
F02-2-4C	18	341	0.05	0.167 00	0.001 61	3.365 78	0.028 09	0.147 01	0.001 27	2 527	11	884	7	1 496	7	48
F02-2-5C	88	70	1.25	0.175 43	0.000 76	11.104 36	0.274 09	0.458 53	0.010 14	2 610	7	2 433	45	2532	23	96
F02-2-6R	8	217	0.04	0.167 34	0.002 84	5.112 23	0.065 80	0.223 45	0.003 35	2 531	29	1 300	18	1 838	11	65
F02-2-7C	25	57	0.43	0.168 19	0.000 37	10.044 93	0.091 27	0.433 23	0.003 95	2 540	4	2 320	18	2 439	8	95
F02-2-8C	28	46	0.61	0.168 55	0.000 70	10.411 43	0.233 42	0.447 74	0.009 46	2 544	7	2 385	42	2 472	21	96
F02-2-9R	7	226	0.03	0.167 29	0.003 58	4.477 92	0.071 18	0.198 25	0.004 48	2 531	36	1 166	24	1 727	13	61
F02-2-10C	35	24	1.44	0.165 44	0.000 32	10.238 29	0.112 08	0.448 76	0.004 83	2 522	4	2 390	22	2 457	10	97
F02-2-11C	44	52	0.86	0.169 16	0.000 30	10.636 71	0.091 64	0.455 92	0.003 82	2 549	4	2 422	17	2 492	8	97
F02-2-12C	1	4	0.38	0.165 45	0.002 52	8.661 90	0.626 56	0.379 87	0.026 82	2 522	26	2 076	125	2 303	66	89
F02-2-13R	7	365	0.02	0.167 09	0.004 48	2.664 36	0.036 19	0.121 12	0.002 72	2 529	45	737	16	1 319	10	43
F02-2-14C	53	62	0.85	0.131 49	0.000 54	6.435 04	0.146 96	0.354 74	0.007 69	2 118	7	1 957	37	2 037	20	95
F02-2-15R	8	189	0.04	0.167 91	0.011 86	4.408 71	0.059 68	0.210 75	0.004 05	2 537	119	1 233	22	1 714	11	67
F02-2-17C	8	24	0.33	0.154 19	0.000 43	7.730 77	0.104 57	0.363 79	0.004 96	2 394	5	2 000	23	2 200	12	90
F02-2-18R	7	225	0.03	0.167 00	0.002 66	4.349 64	0.059 50	0.191 73	0.003 09	2 527	26	1 131	17	1 703	11	59
F02-2-19C	20	19	1.08	0.165 93	0.000 36	10.621 54	0.126 96	0.464 35	0.005 61	2 517	4	2 459	25	2 491	11	98
F02-2-20R	17	253	0.07	0.166 17	0.002 65	3.921 09	0.053 85	0.173 88	0.002 80	2 520	27	1 033	15	1 618	11	55
F02-2-21C	16	113	0.15	0.128 93	0.000 95	5.346 55	0.126 24	0.300 49	0.006 24	2 084	13	1 694	31	1 876	20	89
F02-2-22C	5	10	0.56	0.118 25	0.001 00	4.601 36	0.099 39	0.282 46	0.006 32	1 931	16	1 604	32	1 750	18	91
F02-2-24R	4	68	0.05	0.118 72	0.000 41	5.014 86	0.071 17	0.306 30	0.004 24	1 937	6	1 722	21	1 822	12	94
F02-2-25C	36	50	0.71	0.168 58	0.000 67	9.427 10	0.153 96	0.405 37	0.006 36	2 544	7	2 194	29	2 380	15	91
F02-2-26C	21	90	0.23	0.119 30	0.000 33	4.660 00	0.047 46	0.283 13	0.002 74	1 946	4	1 607	14	1 760	9	90

续表 1
Continued Table 1

样点号	$w_B/\%$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度/%				
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ					
F02-2-27R	5	97	0.05	0.120 56	0.000 62	4.162 00	0.076 94	0.250 44	0.004 66	1 965	9	1 441	24	1 667	15	85
F02-2-28C	51	64	0.80	0.168 02	0.000 64	8.925 60	0.168 90	0.384 86	0.006 67	2 539	6	2 099	31	2 330	17	89
F02-2-29R	13	281	0.05	0.168 49	0.002 60	3.845 82	0.046 91	0.170 50	0.003 44	2 543	26	1 015	19	1 602	10	55
F02-2-30C	65	44	1.47	0.166 21	0.000 30	10.405 44	0.064 84	0.453 91	0.002 75	2 520	4	2 413	12	2 472	6	97
F02-2-31C	427	254	1.68	0.166 48	0.002 24	4.442 35	0.032 18	0.199 90	0.003 48	2 524	23	1 175	19	1 720	6	62
F02-2-33C	42	32	1.32	0.166 20	0.000 67	11.080 56	0.203 06	0.483 40	0.008 42	2 519	8	2 542	37	2 530	17	99
F02-2-34C	35	32	1.10	0.163 28	0.000 59	10.092 14	0.117 63	0.448 18	0.005 08	2 500	6	2 387	23	2 443	11	97
F02-2-35R	7	254	0.03	0.167 71	0.002 68	4.560 69	0.035 69	0.198 31	0.002 24	2 535	26	1 166	12	1 742	7	60
F02-2-36C	153	84	1.83	0.129 30	0.000 23	6.512 18	0.031 61	0.365 26	0.001 81	2 089	2	2 007	9	2 048	4	98
F02-2-37R	75	469	0.16	0.167 97	0.004 68	2.462 89	0.025 00	0.114 92	0.003 69	2 539	47	701	21	1 261	7	42
F02-2-38C	93	71	1.32	0.168 52	0.000 27	10.535 32	0.043 60	0.453 34	0.001 82	2 543	3	2 410	8	2 483	4	97
F02-2-39C	107	58	1.85	0.166 49	0.000 73	10.217 79	0.298 20	0.444 91	0.011 94	2 524	7	2 373	53	2 455	27	96
F02-2-40R	129	123	1.05	0.118 47	0.000 44	4.655 68	0.040 41	0.286 22	0.003 27	1 933	6	1 623	16	1 759	7	91
F02-2-41C	137	71	1.92	0.168 55	0.000 29	10.556 30	0.040 66	0.454 29	0.001 87	2 544	3	2 414	8	2 485	4	97
F02-2-42C	9	247	0.04	0.190 83	0.002 76	5.646 82	0.027 36	0.215 53	0.002 96	2 749	24	1 258	16	1 923	4	58
F02-2-43C	74	75	0.98	0.166 68	0.000 26	10.088 13	0.041 09	0.438 85	0.001 64	2 524	3	2 345	7	2 443	4	95
F02-2-44R	9	251	0.04	0.166 91	0.002 00	4.927 72	0.020 57	0.218 27	0.002 50	2 528	20	1 273	13	1 807	4	65
F02-2-45C	127	66	1.93	0.127 68	0.000 32	4.774 72	0.049 35	0.271 19	0.002 74	2 066	5	1 547	14	1 780	9	85
F02-2-46R	17	299	0.06	0.167 21	0.001 25	4.243 71	0.013 39	0.185 44	0.001 59	2 531	12	1 097	9	1 683	3	57
F02-2-47C	17	19	0.93	0.166 12	0.000 75	9.726 28	0.092 76	0.424 47	0.003 23	2 520	3	2 281	15	2 409	9	94
F02-2-48C	36	30	1.20	0.165 30	0.000 73	10.855 08	0.078 91	0.476 17	0.002 71	2 511	7	2 511	12	2 511	7	99
F02-2-49R	3	141	0.02	0.119 34	0.000 31	4.931 84	0.020 25	0.300 00	0.001 51	1 947	4	1 691	8	1 808	3	93
F02-2-50C	23	26	0.88	0.163 20	0.000 33	9.765 44	0.048 22	0.433 90	0.002 00	2 500	3	2 323	9	2 413	5	96

注：表中“C”表示分析位置位于锆石核部，“R”表示分析位置位于边部。

表2 阜平岩群浅粒岩(F02-2)锆石 Lu-Hf 同位素测试结果

Table 2 Zircon Lu-Hf isotopic analyses of leucite (F02-2) in the Yuanfang Formation of the Fuping Group

分析点	年龄	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1}	t_{DM2}
F02-2-2R	2 125	0.012 122	0.000 119	0.000 613	0.000 007	0.281 390	0.000 016	-0.981 542	0.281 365	-48.9	-2.25	2 574	2 707
F02-2-3C	2 520	0.031 845	0.000 307	0.001 286	0.000 011	0.281 314	0.000 020	-0.961 267	0.281 252	-51.6	2.83	2 724	2 779
F02-2-4C	2 527	0.017 356	0.000 062	0.000 788	0.000 003	0.281 453	0.000 010	-0.976 253	0.281 415	-46.6	8.79	2500	2 492
F02-2-5C	2 610	0.041 142	0.000 106	0.001 627	0.000 005	0.281 333	0.000 018	-0.950 986	0.281 251	-50.9	4.88	2 723	2 752
F02-2-6R	2 531	0.016 140	0.000 129	0.000 746	0.000 006	0.281 436	0.000 012	-0.977 522	0.281 400	-47.2	8.34	2 520	2 517
F02-2-7C	2 540	0.006 240	0.000 283	0.000 289	0.000 013	0.281 324	0.000 016	-0.991 284	0.281 310	-51.2	5.36	2 640	2 671
F02-2-8C	2 544	0.031 062	0.000 459	0.001 239	0.000 018	0.281 301	0.000 017	-0.962 676	0.281 241	-52.0	2.97	2 738	2 791
F02-2-9R	2 531	0.019 577	0.000 191	0.000 905	0.000 010	0.281 444	0.000 012	-0.972 730	0.281 400	-47.0	8.32	2 520	2 517
F02-2-10C	2 522	0.021 433	0.000 128	0.000 852	0.000 005	0.281 310	0.000 016	-0.974 323	0.281 269	-51.7	3.48	2 698	2 749
F02-2-11C	2 549	0.010 484	0.000 075	0.000 426	0.000 003	0.281 256	0.000 016	-0.987 166	0.281 235	-53.6	2.90	2 741	2 799
F02-2-12C	2 522	0.015 324	0.000 296	0.000 617	0.000 010	0.281 341	0.000 020	-0.981 419	0.281 311	-50.6	4.97	2 641	2 676
F02-2-13R	2 529	0.020 966	0.000 098	0.000 962	0.000 004	0.281 365	0.000 021	-0.971 013	0.281 318	-49.8	5.37	2 632	2 661
F02-2-14C	2 118	0.104 837	0.000 180	0.003 365	0.000 006	0.281 680	0.000 021	-0.898 655	0.281 544	-38.6	3.95	2 349	2 395
F02-2-15R	2 537	0.017 712	0.000 161	0.000 741	0.000 007	0.281 498	0.000 013	-0.977 681	0.281 462	-45.1	10.67	2 436	2 407
F02-2-17C	2 394	0.021 393	0.000 132	0.000 935	0.000 005	0.281 409	0.000 018	-0.971 847	0.281 367	-48.2	4.00	2 569	2 619
F02-2-18R	2 527	0.018 671	0.000 087	0.000 884	0.000 004	0.281 407	0.000 012	-0.973 359	0.281 365	-48.3	7.00	2 568	2 580
F02-2-19C	2 517	0.010 755	0.000 180	0.000 431	0.000 007	0.281 311	0.000 017	-0.987 011	0.281 291	-51.7	4.12	2 667	2 713
F02-2-20R	2 520	0.018 212	0.000 111	0.000 837	0.000 004	0.281 455	0.000 012	-0.974 780	0.281 415	-46.6	8.61	2 500	2 495
F02-2-21C	2 084	0.093 263	0.001 907	0.003 086	0.000 050	0.281 668	0.000 021	-0.907 047	0.281 545	-39.1	3.21	2 348	2 404
F02-2-24R	1 937	0.015 798	0.000 069	0.000 750	0.000 003	0.281 459	0.000 013	-0.977 403	0.281 432	-46.4	-4.19	2 489	2 650
F02-2-25C	2 544	0.016 951	0.000 264	0.000 765	0.000 011	0.281 339	0.000 016	-0.976 945	0.281 302	-50.7	5.13	2 653	2 685
F02-2-28C	2 539	0.035 671	0.000 173	0.001 408	0.000 006	0.281 364	0.000 017	-0.957 587	0.281 296	-49.8	4.81	2 563	2 697

续表 2
Continued Table 2

分析点	年龄	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1}	t_{DM2}
F02-2-29R	2 543	0.021 573	0.000 169	0.001 014	0.000 007	0.281 383	0.000 014	-0.969 450	0.281 334	-49.1	6.26	2 610	2 629
F02-2-30C	2 520	0.017 425	0.000 369	0.000 697	0.000 013	0.281 295	0.000 018	-0.978 999	0.281 262	-52.2	3.16	2 708	2 763
F02-2-31C	2 524	0.019 590	0.000 554	0.000 780	0.000 015	0.281 458	0.000 013	-0.976 503	0.281 420	-46.5	8.90	2 493	2 484
F02-2-33C	2 519	0.009 252	0.000 031	0.000 384	0.000 001	0.281 315	0.000 015	-0.988 442	0.281 297	-51.5	4.40	2 659	2 702
F02-2-34C	2 500	0.017 262	0.000 709	0.000 735	0.000 029	0.281 320	0.000 017	-0.977 861	0.281 285	-51.3	3.54	2 676	2 728
F02-2-35R	2 535	0.016 343	0.000 089	0.000 746	0.000 004	0.281 432	0.000 014	-0.977 542	0.281 396	-47.4	8.28	2 526	2 523
F02-2-36C	2 089	0.075 320	0.002 213	0.002 651	0.000 076	0.281 709	0.000 023	-0.920 160	0.281 604	-37.6	5.39	2 260	2 300
F02-2-38C	2 543	0.012 889	0.000 030	0.000 512	0.000 001	0.281 255	0.000 017	-0.984 586	0.281 230	-53.6	2.58	2 748	2 810
F02-2-39C	2 524	0.011 101	0.000 201	0.000 457	0.000 006	0.281 295	0.000 015	-0.986 226	0.281 273	-52.2	3.66	2 691	2 742
F02-2-40R	1 933	0.017 898	0.000 209	0.000 869	0.000 008	0.281 419	0.000 014	-0.973 833	0.281 387	-47.8	-5.86	2 551	2 730
F02-2-41C	2 544	0.021 116	0.000 074	0.000 842	0.000 003	0.281 304	0.000 016	-0.974 627	0.281 263	-51.9	3.74	2 706	2 753
F02-2-42C	2 749	0.017 856	0.000 200	0.000 823	0.000 009	0.281 449	0.000 011	-0.975 215	0.281 406	-46.8	13.62	2 507	2 437
F02-2-43C	2 524	0.017 194	0.000 148	0.000 689	0.000 006	0.281 301	0.000 018	-0.979 257	0.281 267	-52.0	3.47	2 700	2 751
F02-2-44R	2 528	0.018 007	0.000 126	0.000 808	0.000 004	0.281 460	0.000 013	-0.975 674	0.281 421	-46.4	9.00	2 492	2 481
F02-2-45C	2 066	0.126 608	0.001 876	0.004 262	0.000 065	0.281 791	0.000 023	-0.871 639	0.281 623	-34.7	5.57	2 242	2 272
F02-2-46R	2 531	0.019 621	0.000 099	0.000 885	0.000 002	0.281 460	0.000 013	-0.973 341	0.281 417	-46.4	8.97	2 496	2 486
F02-2-47C	2 520	0.009 993	0.000 047	0.000 419	0.000 001	0.281 299	0.000 014	-0.987 369	0.281 279	-52.1	3.78	2 683	2 732
F02-2-48C	2 511	0.011 982	0.000 022	0.000 482	0.000 001	0.281 329	0.000 017	-0.985 473	0.281 306	-51.0	4.52	2 647	2 688
F02-2-49R	1 947	0.010 433	0.000 197	0.000 494	0.000 009	0.281 445	0.000 015	-0.985 128	0.281 427	-46.9	-4.12	2 491	2 655
F02-2-50C	2 500	0.007 985	0.000 032	0.000 386	0.000 002	0.281 335	0.000 015	-0.988 388	0.281 316	-50.8	4.64	2 633	2 673

注: 锆石 Hf 同位素计算所用的参数为: ^{176}Lu 衰变常数 $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}$, 球粒陨石 (CHUR) $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.033\ 2$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282\ 772$ (Blichert-Toft and Albarade, 1997); 亏损地幔 (DM) $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.038\ 4$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.283\ 25$ (Griffin *et al.*, 2000); 长英质 (felsic) 上地壳的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ 为 -0.72 (Vervoort *et al.*, 2000)。

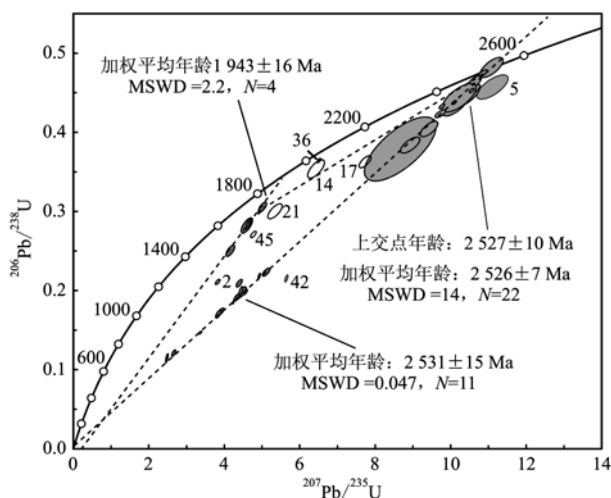


图4 元坊岩组浅粒岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram of lepite in the Yuanfang Formation of the Fuping Group

2 810 Ma(表2)。不同类型锆石区域的计算结果有一些差异(图5),其中~2.5 Ga 的锆石核部计算的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 2.58~8.90, ~2.5 Ga 的边部变质锆石区域计算的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 5.37~10.67, ~1.95 Ga 的变质锆石区域计算的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -5.86~-4.12(表2)。

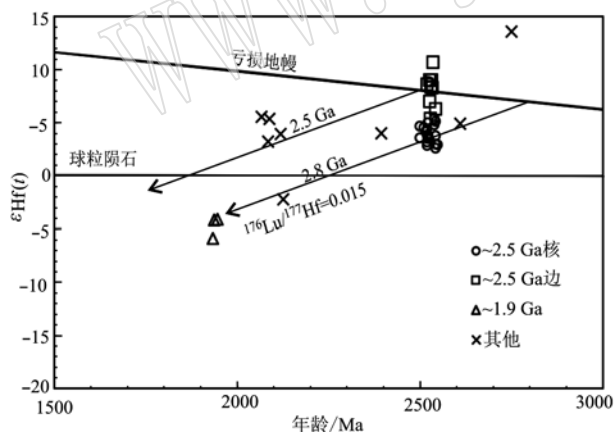
图5 元坊岩组浅粒岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 与 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄关系图

Fig. 5 Zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ versus $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age plots for lepite in Yuanfang Formation of the Fuping Group

4.3 地球化学

本次研究对2个样品(F02-1和F02-2)进行了全岩地球化学分析,样品呈现高硅(SiO_2 : 84.25%~88.16%)、高钾(K_2O : 3.43%~3.50%)、低镁(MgO : 0.12%~0.29%)、钠(Na_2O : 0.11%~

0.21%)、钙(CaO : 0.01%~0.02%)的特征(表3)。样品稀土元素总量较低($\sum \text{REE} = 19.55 \times 10^{-6} \sim 33.24 \times 10^{-6}$),重稀土元素部分近于平坦,轻重稀土元素呈中等程度到较强烈分异[(La/Lu)_N = 9.07~13.78],并出现铕异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.86 \sim 1.71$,表3,图6a)。在微量元素配分图中,呈现出Nb、P、Ti的负异常(图6b),与前人研究阜平地区浅粒岩地球化学特征相似(万渝生等,2002a,2002b)。

表3 阜平岩群浅粒岩的主量($w_B/\%$)及微量元素($w_B/10^{-6}$)测试结果

Table 3 Analytical results of major elements ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) of lepite in the Yuanfang Formation of the Fuping Group

样品号	F02-1	F02-2	样品号	F02-1	F02-2	样品号	F02-1	F02-2
SiO_2	88.16	84.25	Nd	7.05	3.61	Cr	11.3	16.4
Al_2O_3	5.77	8.58	Sm	0.87	0.42	Cs	0.61	0.92
Fe_2O_3	0.46	0.38	Eu	0.25	0.22	Ga	5.34	12.3
FeO	0.56	0.88	Cd	0.89	0.35	Hf	1.70	2.83
CaO	0.02	0.01	Tb	0.12	0.05	Mo	0.07	0.14
MgO	0.12	0.29	Dy	0.61	0.26	Nb	1.97	6.52
K_2O	3.43	3.50	Ho	0.10	0.05	Ni	2.13	5.18
Na_2O	0.21	0.11	Er	0.29	0.14	Pb	5.57	3.92
TiO_2	0.07	0.16	Tm	0.05	0.05	Rb	79.5	95.5
MnO	0.01	0.01	Yb	0.26	0.18	Sc	1.13	5.94
P_2O_5	0.01	0.01	Y	2.72	1.29	Sr	38.0	33.4
LOI	0.51	1.17	Lu	0.05	0.05	Ta	0.44	0.58
Total	99.33	99.35	$\sum \text{REE}$	33.24	19.55	Th	1.64	1.61
TFEO	0.97	1.22	(La/Lu) _N	13.78	9.07	U	0.22	0.19
La	6.43	4.23	Eu/Eu^*	0.86	1.71	V	43.0	41.8
Ce	11.9	7.64	Ba	631	561	Zr	58.4	91.6
Pr	1.75	1.01	Co	0.67	1.27			

5 讨论

根据岩石组合、沉积旋回、火山喷发、标志层等特征,阜平岩群被划分为索家庄岩组和元坊岩组(程裕淇等,2004)。早期利用 Sm-Nd、Rb-Sr 和单颗粒锆石 U-Pb 等同位素方法限定阜平岩群的时代跨度为古太古代-新太古代(刘敦一等,1984;伍家善等,1989;吴昌华等,2000;沈保丰等,2005)。根据新的 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素定年技术,限定索家庄岩组的沉积时代为 2.7~2.54 Ga(程裕淇等,2004;杨崇辉等,2015)。而元坊岩组中仅获得斜长角闪岩 Sm-Nd 等时线年龄为 2 791 Ma 和 2 560 Ma。程裕淇等(2004)认为元坊岩组与索家庄岩组形成时代基本相同,并经历了两期变质作用叠加。但对于元坊岩组的沉积时代尚缺乏准确的年代学数据限定。

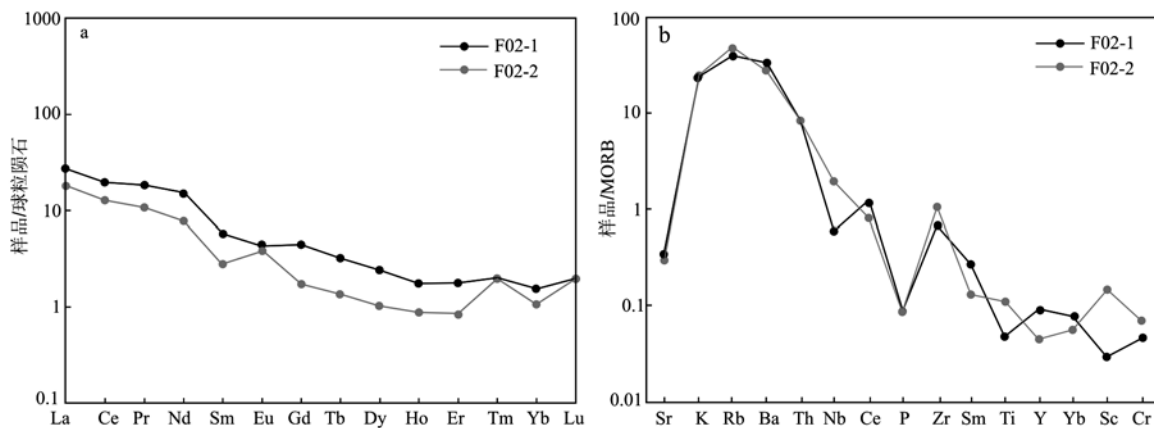


图6 元坊岩组浅粒岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a, 据 Sun and McDonough, 1989)及大洋中脊玄武岩标准化微量元素配分图(b, 据 Pearce, 1983)

Fig. 6 Chondrite-normalized REEs patterns (a, after Sun and McDonough, 1989) and MORB-normalized trace elements patterns (b, after Pearce, 1983) of leptyte in the Yuanfang Formation

本文的浅粒岩样品(F02-2)选自元坊岩组底部标志层。其核部碎屑锆石获得上交点年龄为 $2\,527 \pm 10$ Ma, 同时靠近谐和上分析点的一组锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄位于 $2\,549 \sim 2\,500$ Ma 之间, 加权平均年龄为 $2\,526 \pm 7$ Ma (MSWD = 14), 而较老的一组变质边部锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\,531 \pm 15$ Ma。根据核部碎屑锆石的加权平均年龄限定元坊岩组应沉积于 $2\,526$ Ma 之后; 而依据浅粒岩中变质作用的时代, 该套变质表壳岩的沉积时代应早于 $2\,531$ Ma, 两者似乎矛盾。耿元生等(2018)在研究冀东地区经历高级变质岩石的年代学数据时发现, 岩浆核部与变质增生的边部年龄很接近, 甚至常出现核部低于边部的年龄结果, 推断可能与后期变质事件影响引起核部锆石 U-Pb 体系不同程度的重置有关。根据现有的研究资料, 阜平岩群经历了两期角闪岩相到麻粒岩相的变质作用(程裕淇等, 2004; 杨崇辉等, 2015)。从锆石阴极发光图像分析, 元坊岩组浅粒岩部分锆石核部具有岩浆环带, 但大部分核部无明显结构, 显然遭受了不同程度的改造。因此, 大部分核部 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄较初始年龄值偏低, 可能并无实际的地质意义(Wan *et al.*, 2011)。因此, 本文选取核部 $2\,549 \sim 2\,500$ Ma 碎屑锆石中 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄最大的结果 $2\,549 \pm 4$ Ma 代表原岩的最大沉积年龄, 初步限定阜平岩群元坊岩组的初始沉积时代为 $2\,550 \sim 2\,530$ Ma。但这一结果还需要更多的同位素年代学资料验证。

元坊岩组浅粒岩的主要组成矿物为石英和钾长

石, 其沉积物源区应来自于花岗质岩石和/或长英质火山岩, 并遭受强烈的风化剥蚀、搬运和分选沉积而成。而浅粒岩中稀土元素和 Zr、Hf 等微量元素含量极低可能是源岩沉积过程中, 富含稀土与微量元素的重矿物与长石、石英等差异分选的结果。本文研究的浅粒岩主体碎屑锆石年龄集中于新太古代晚期, 但其中也保留有 2.7 Ga 和 2.6 Ga 的碎屑锆石信息(表2)。阜平地区新太古代 $2.7 \sim 2.5$ Ga 岩浆岩分布广泛, 主体以 TTG 质片麻岩为主(Guan *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2002; 程裕淇等, 2004; Han *et al.*, 2012; 路增龙等, 2014; 杨崇辉等, 2015; 杨崇辉等未发表资料), 该阶段的岩浆活动为元坊岩组浅粒岩的原岩提供了重要的物源。

Lu-Hf 同位素体系具有与 Sm-Nd 体系相似的特性而广泛应用于地球动力学研究(吴福元等, 2007)。本文 $2.55 \sim 2.50$ Ga 碎屑锆石核部 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $2.58 \sim 8.90$, 计算结果位于 $2.8 \sim 2.7$ Ga 地壳演化线之间。与自然铅丢失(recent Pb loss)不同, 由于早期地质事件引起锆石的铅丢失(ancient Pb loss)会导致计算获得 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值偏低(Vervoort and Kemp, 2016)。元坊岩组浅粒岩中核部碎屑锆石不同程度受到变质作用的影响, 因此其 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值可能较初始值偏低。本文 ~ 2.5 Ga 变质锆石区域 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $5.37 \sim 10.67$, 位于亏损地幔演化线附近。因此, 推断 $2.55 \sim 2.50$ Ga 碎屑锆石核部真实 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值可能位于亏损地幔演化线附近。核部锆石两阶段 Hf 模式年龄主要集中于 $2.8 \sim 2.6$ Ga, 与阜平杂岩主体的

新太古代 TTG 质片麻岩 Hf 和 Nd 同位素结果一致 (Liu *et al.*, 2002; Han *et al.*, 2012)。表明阜平与华北其他地区类似 (Geng *et al.*, 2012; Wan *et al.*, 2015), 2.8 ~ 2.6 Ga 为阜平杂岩陆壳生长的重要阶段。

华北克拉通东部陆块内部广泛记录了 ~2.5 Ga 变质事件, 而在中部造山带内 1.96 ~ 1.8 Ga 变质作用非常强烈 (Zhao *et al.*, 2012; Qian *et al.*, 2013; Lu *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014; Xiao *et al.*, 2017)。近年来, 在中部造山带的阜平和赞皇地区陆续发现新太古代末期 ~2.5 Ga 的变质作用记录 (程裕淇等, 2004; Xiao *et al.*, 2014; 杨崇辉等, 2015; 肖玲玲等, 2019)。本次研究在元坊岩组浅粒岩中锆石共获得了两期变质年龄信息, 分别是 2531 ± 15 Ma 及 1943 ± 16 Ma。其中 2531 ± 15 Ma 的变质锆石域具有较低的 Th/U 值 (0.02 ~ 0.16), 与核部锆石具有清晰的界线 (图 3), 部分切割或改造了核部锆石, 均指示了变质重结晶锆石的特征 (Fernando *et al.*, 2003; 吴元保等, 2004)。结合索家庄岩组中新太古代末期的变质信息 (程裕淇等, 2004), 表明阜平岩群 (阜平杂岩) 经历较广泛的 ~2.5 Ga 区域变质作用, 该期变质事件可能与华北不同微陆块的拼合, 初步克拉通化有密切联系 (翟明国, 2011)。而浅粒岩中古元古代晚期变质信息 (1943 ± 16 Ma), 应记录了华北克拉通最终陆块聚合完成克拉通化的过程 (Qian *et al.*, 2013; Xiao *et al.*, 2017)。

6 初步结论

阜平岩群元坊岩组浅粒岩中核部碎屑锆石年龄结果为 2526 ± 7 Ma, 两期变质年龄结果分别为 2531 ± 15 Ma 和 1943 ± 16 Ma。选择核部 2549 ~ 2500 Ma 碎屑锆石中 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄最大的 2549 ± 4 Ma 代表原岩的最大沉积年龄, 初步限定元坊岩组的时代 2550 ~ 2530 Ma。而锆石 Hf 同位素揭示 2.8 ~ 2.6 Ga 代表阜平地区强烈的地壳生长阶段。新太古代末期和古元古代晚期两期变质信息可能分别代表华北的初步稳定和最终克拉通化过程。

致谢 在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年工作中得到中国地质科学院矿产与资源研究所侯可军老师的支持与帮助, 多位审稿专家及编辑部老师对本文提出了宝贵的意见, 在此一并表示感谢。

References

- Amelin Y, Lee D C and Halliday A N. 2000. Early-middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64 (24): 4 205 ~ 4 225.
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 148(1 ~ 2): 243 ~ 258.
- Cheng Yuqi, Yang Chonghui, Wan Yusheng, *et al.* 2004. Early Pre-Cambrian Geologic Feature And Reconstruction of Crustal Rocks by Deep Melting in the Middle-Northern Part of Taihang Mountains [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 191 (in Chinese).
- Cherniak D J and Watson E B. 2003. Diffusion in zircon [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 113 ~ 143.
- Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, *et al.* 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(12): 1 567 ~ 1 574.
- Du Lilin, Yang Chonghui, Wang Wei, *et al.* 2011. The re-examination of the age and stratigraphic subdivision of the Hutuo Group in the Wutai Mountains area, North China Craton: Evidences from geology and zircon U-Pb geochronology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1 037 ~ 1 055 (in Chinese with English abstract).
- Elhlou S, Belousova E A, Griffin W L, *et al.* 2006. Trace element and isotopic composition of GJ red zircon standard by Laser Ablation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A158.
- Fedo C, Sircombe K and Rainbird R. 2003. Detrital zircon analysis of the sedimentary record [J]. *Review in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 277 ~ 303.
- Fernando C, Hanchar J, Hoskin P W O, *et al.* 2003. Atlas of zircon texture [J]. *Review in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 469 ~ 500.
- Finch R and Hanchar J. 2003. Structure and chemistry of zircon and zircon-group minerals [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 1 ~ 25.
- Geng Yuansheng, Du Lilin and Ren Liudong. 2012. Growth and reworking of the early Precambrian continental crustal in the North China Craton: Constraints from zircon Hf isotopes [J]. *Gondwana Research*, 21: 517 ~ 529.
- Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Du Lilin, *et al.* 2018. Late Neoproterozoic magmatism and crustal growth in eastern Hebei: Constraint from geochemistry, zircon U-Pb ages and Hf isotope [J]. *Acta Petro-*

- logica Sinica, 34(4): 1 058 ~ 1 082 (in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133 ~ 147.
- Guan H, Sun M, Wilde S A, *et al.* 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping Complex: Implications for formation and assembly of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 113: 1 ~ 18.
- Han B F, Xu Z, Ren R, *et al.* 2012. Crustal growth and intracrustal recycling in the middle segment of the Trans-North China Orogen, North China Craton: A case study of the Fuping Complex[J]. *Geological Magazine*, 149: 729 ~ 742.
- Hoskin P W O and Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 423 ~ 439.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong, *et al.* 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481 ~ 492 (in Chinese with English abstract).
- Kang D, Amarasingiwardena D and Goodman A-H. 2004. Application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS) to investigate trace metal spatial distributions in human tooth enamel and dentine growth layers and pulp[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 378: 1 608 ~ 1 615.
- Li Jihong, Yang Chonghui, Du Lilin, *et al.* 2005. SHRIMP U-Pb geochronology evidence for the formation time of the Wanzi Group at Pingshan County, Hebei Province[J]. *Geological Review*, 51(2): 201 ~ 207 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dunyi, Page R W, Compston W, *et al.* 1984. U-Pb zircon geochronology of Precambrian metamorphic rocks in the Taihangshan-Wutaishan area, North China[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 8: 57 ~ 82 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shuwen. 1997. Research on fluid and rock equilibrium system of Fuping Complex in Taihang Mountains[J]. *Science in China Series D—Earth Sciences*, 27(3): 239 ~ 244 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shuwen, Liang Haihua, Zhao Guochun, *et al.* 2000. Isotope geochronology and geological events of the Early Precambrian complex in the Taihang Mountains[J]. *Science in China Series D—Earth Sciences*, 30(1): 18 ~ 24 (in Chinese with English abstract).
- Liu S, Pan Y, Li J, *et al.* 2002. Geological and isotopic geochemical constraints on the evolution of the Fuping Complex, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 117: 41 ~ 56.
- Liu Shuwen, Pan Yuanming, Xie Qianli, *et al.* 2004. Archean geodynamics in the Central Zone, North China Craton: Constraints from geochemistry of two constraints series of granitoids in the Fuping and Wutai complexes[J]. *Precambrian Research*, 130: 229 ~ 249.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51: 537 ~ 571.
- Lu J S, Wang G D, Wang H, *et al.* 2014. Paleoproterozoic metamorphic evolution and geochronology of the Wugang block, southeastern terminal of the Trans-North China Orogen[J]. *Precambrian Research*, 251: 197 ~ 211.
- Lu Zenglong, Song Huixia, Du Lilin, *et al.* 2014. Delineation of the ca. 2.7 Ga TTG gneisses in the Fuping complex, North China Craton and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2 872 ~ 2 884 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot/Ex, Version 3.00, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1 ~ 50.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, *et al.* 2008. Zircon M257-a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. *Geostandards & Geoanalytical Research*, 32: 247 ~ 265.
- Pearce J. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margin[A]. *Continental Basalts and Mantle Xenoliths[C]*, 230 ~ 249.
- Qian J, Wei C, Zhou X, *et al.* 2013. Metamorphic *P-T* paths and new zircon U-Pb age data for garnet-mica schist from the Wutai Group, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 233: 282 ~ 296.
- Ren L D, Geng Y S, Du L L, *et al.* 2013. SHRIMP data on zircons from the Wanzi series: Constraints on the rock formation time and implications of migmatization at 2.1-2.0 Ga in the Fuping Complex, North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 203 ~ 215.
- Ren Liudong, Yang Chonghui and Du Lilin. 2009. Formation of low-grade magnetite deposit and its relationship with anatexis in Fuping complex[J]. *Mineral Deposits*, 28(5): 653 ~ 662 (in Chinese with English abstract).
- Shen Baofeng, Li Junjian, Lin Yuanxian, *et al.* 2005. Sm-Nd isotope age of the lower Fuping Group Complex and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 784 ~ 789 (in Chinese with English abstract).
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495 ~ 500

- (in Chinese with English abstract).
- Sun Min and Guan Hong. 2001. Zircon U-Pb ages of the Fuping Complex and their implications: Some comments on the geochronological study of the Precambrian high-grade metamorphic terranes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 145 ~ 156 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. Geological Society, London. Special Publication. 42(1): 313 ~ 345.
- Tang L, Santosh M, Tsunogae T, *et al.* 2016. Paleoproterozoic meta-carbonates from the central segment of the Trans-North China Orogen: Zircon U-Pb geochronology, geochemistry, and carbon and oxygen isotopes[J]. *Precambrian Research*, 284: 14 ~ 29.
- Vervoort J D and Kemp A I S. 2016. Clarifying the zircon Hf isotope record of crust-mantle evolution[J]. *Chemical Geology*, 425: 65 ~ 75.
- Vervoort J D, Patchett P J, Albarède F, *et al.* 2000. Hf-Nd isotopic evolution of the lower crust[J]. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 181: 115 ~ 129.
- Wan Yusheng, Cheng Yuqi and Yang Chonghui. 2002a. Study on geochemistry of biotite leptyte gneisses and their anatexitic derivatives of the Fuping Complex-Group[J]. *Geological Review*, 48(s): 36 ~ 44 (in Chinese with English abstract).
- Wan Yusheng, Liu Dunyi, Dong Chunyan, *et al.* 2011. U-Th-Pb behavior of zircons under high-grade metamorphic conditions: A case study of zircon dating of meta-diorite near Qixia, eastern Shandong[J]. *Geoscience Frontiers*, 2: 137 ~ 146.
- Wan Y S, Liu D Y, Dong C Y, *et al.* 2015. Formation and evolution of Archean Continental Crust of the North China Craton[A]. Zhai M. *Precambrian Geology of China*[C]. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 59 ~ 136.
- Wan Yusheng and Yang Chonghui. 2002b. Geochemical study on anatexis of leucoplexites in Fuping Group of Xiaojue area, Pingshan County, Hebei Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(4): 421 ~ 428 (in Chinese with English abstract).
- Wan Yusheng, Zhang Qiaoda and Song Tianrui. 2003. The detrital zircon age of the Changzhougou Formation in the Changcheng Series of Beijing's Ming Tombs: The source area of the North China Craton cape and the maximum sedimentary age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(18): 1 970 ~ 1 975 (in Chinese with English abstract).
- Wang G D, Wang H, Chen H X, *et al.* 2014. Metamorphic evolution and zircon U-Pb geochronology of the Mts. Huashan amphibolites: Insights into the Paleoproterozoic amalgamation of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 245: 100 ~ 114.
- Wang Jianlong, Yang Chonghui and Wyman Derek A. 2020. Petrogenesis and tectonic implications of the 2.1-2.0 Ga granitoids in Fuping Complex, North China Craton: Constraints from petrology, geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopes[J]. *Precambrian Research*, 339: 105611.
- Wu Changhua, Li Huimin, Zhong Changting, *et al.* 2000. TIMS U-Pb single zircon ages for the orthogneiss and the paragneiss of Fuping Complex: Implications for existence of the Palaeoproterozoic supracrustal rocks in the central basement of North China Craton[J]. *Progress in Precambrian Research*, 23(3): 129 ~ 139 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematic and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185 ~ 220 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jiashan, Geng Yuansheng, Xu Huifen, *et al.* 1989. Metamorphic geology of the Fuping Group[J]. *Bulletin of the Institute of Geology Chinese Academy of Geological Sciences*, 19: 1 ~ 213 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Study on the mineralogy of zircon and its constraints on the interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1 589 ~ 1 604 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Lingling, Liu Fulai and Chen Yi. 2014. Metamorphic *P-T-t* paths of the Zhanhuang metamorphic complex: Implications for the Paleoproterozoic evolution of the Trans-North China Orogen[J]. *Precambrian Research*, 255: 216 ~ 235.
- Xiao L L, Clarke G, Liu F L, *et al.* 2017. Discovery of mafic granulite in the Guandishan area of the Liliang Complex, North China Craton: Age and metamorphic evolution[J]. *Precambrian Research*, 303: 604 ~ 625.
- Xiao Lingling, Liu Fulai and Zhang Jian. 2019. Records and its geological implication of metamorphic ages of ca. 2.5 Ga and ca. 1.9 Ga from the Zuoquan metamorphic complex in the Trans-North China Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(4): 969 ~ 988 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chonghui, Du Lilin, Ren Liudong, *et al.* 2015. Early Precambrian Stratigraphic Division and Magmatic Evolution of North China Craton [M]. Beijing: Science Press, 1 ~ 277 (in Chinese).
- Yang Chonghui, Du Lilin, Song Huixia, *et al.* 2018. Stratigraphic division and correlation of the Paleoproterozoic strata in the North China Craton: A review[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(4): 1 019 ~ 1 057 (in Chinese with English abstract).

- Yang Chonghui, Du Lilin, Wan Yusheng, *et al.* 2004. SHRIMP zircon U-Pb chronology of tonalitic gneiss in Banqiaogou Area, Pingshan County, Hebei Province[J]. Geological Journal of China Universities, 10(4): 514~522(in Chinese with English abstract).
- Zhao G and Cawood P A. 2012. Precambrian geology of China[J]. Precambrian Research, 222~223: 13~54.
- Zhao Guochun, Cawood Peter A, Li Sanzhong, *et al.* 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. Precambrian Research, 222~223: 55~76.
- Zhao G C, Sun M and Wilde S. 2002. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping Complex: Implications for late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton[J]. American Journal of Science, 302: 191~226.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. Precambrian Research, 136: 177~202.
- Zhai Mingguo. 2011. Cratonization and the Ancient North China Continent: A summary and review[J]. Science China Earth Sciences, 41(8): 1 037~1 046(in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 2013. Secular changes of metallogenic systems link with continental evolving of the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(5): 1 759~1 773(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 程裕淇, 杨崇辉, 万渝生, 等. 2004. 太行山中北段早前寒武纪地质和深熔作用对地壳岩石的改造[M]. 北京: 地质出版社, 1~191.
- 杜利林, 杨崇辉, 王伟, 等. 2011. 五台地区溥沱群时代与地层划分新认识: 地质学与锆石年代学证据[J]. 岩石学报, 27(4): 1 037~1 055.
- 耿元生, 杨崇辉, 杜利林, 等. 2018. 冀东地区新太古代晚期的岩浆事件与地壳增生: 来自岩石地球化学和锆石年龄及 Hf 同位素的制约[J]. 岩石学报, 34(4): 1 058~1 082.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4): 481~492.
- 李基宏, 杨崇辉, 杜利林, 等. 2005. 河北平山湾子群的时代: SHRIMP 锆石年代学证据[J]. 地质论评, 51(2): 201~207.
- 刘敦一, Page R W, Compston W, 等. 1984. 太行山-五台山区前寒武纪变质岩系同位素地质年代学研究[J]. 中国地质科学院院报, 8: 57~82.
- 刘树文. 1997. 太行山阜平片麻岩的流体与岩石平衡体系研究[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 27(3): 239~244.
- 刘树文, 梁海华, 赵国春, 等. 2000. 太行山早前寒武纪杂岩的同位素年代学和地质事件[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 30(1): 18~24.
- 路增龙, 宋会侠, 杜利林, 等. 2014. 华北克拉通阜平杂岩中~2.7 Ga TTG 片麻岩的厘定及其地质意义[J]. 岩石学报, 30(10): 2 872~2 884.
- 任留东, 杨崇辉, 杜利林. 2009. 阜平杂岩中低品位磁铁矿的形成与深熔作用的关系[J]. 矿床地质, 28(5): 653~662.
- 沈保丰, 李俊建, 林源贤, 等. 2005. 阜平岩群下部 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 79(6): 784~789.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 495~500.
- 孙敏, 关鸿. 2001. 阜平杂岩年龄及其地质意义: 兼论前寒武高级变质地体的定年问题[J]. 岩石学报, 17(1): 145~156.
- 万渝生, 程裕淇, 杨崇辉. 2002a. 河北平山县小觉地区阜平岩群黑云变粒岩——片麻岩深熔作用地球化学研究[J]. 地质论评, 48(s): 36~44.
- 万渝生, 杨崇辉. 2002b. 河北平山小觉地区阜平岩群浅粒岩深熔作用的地球化学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 21(4): 421~428.
- 万渝生, 张巧大, 宋天锐. 2003. 北京十三陵长城系常州沟组碎屑锆石 SHRIMP 年龄: 华北克拉通盖层物源区及最大沉积年龄的限定[J]. 科学通报, 48(18): 1 970~1 975.
- 吴昌华, 李惠民, 钟长汀, 等. 2000. 阜平片麻岩和湾子片麻岩的单颗粒锆石 U-Pb 年龄——阜平杂岩并非一统太古宙基底的时代学证据[J]. 前寒武纪研究进展, 20(3): 129~139.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 伍家善, 耿元生, 徐惠芬, 等. 1989. 阜平群变质地质[J]. 中国地质科学院地质研究所所刊, 19: 1~213.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1 589~1 604.
- 肖玲玲, 刘福来, 张健. 2019. 华北中部造山带左权变质杂岩 ca. 2.5 Ga 和 ca. 1.9 Ga 变质年龄记录及其地质意义[J]. 岩石学报, 35(4): 969~988.
- 杨崇辉, 杜利林, 任留东, 等. 2015. 华北克拉通早前寒武纪地层划分对比及岩浆演化[M]. 科学出版社, 1~277.
- 杨崇辉, 杜利林, 宋会侠, 等. 2018. 华北克拉通元古代地层划分与对比[J]. 岩石学报, 34(4): 1 019~1 057.
- 杨崇辉, 杜利林, 万渝生, 等. 2004. 河北平山英云闪长质片麻岩锆石 SHRIMP 年代学[J]. 高校地质学报, 10(4): 514~522.
- 翟明国. 2011. 克拉通化与华北陆块的形成[J]. 中国科学: 地球科学, 41(8): 1 037~1 046.
- 翟明国. 2013. 华北前寒武纪成矿系统与重大地质事件的联系[J]. 岩石学报, 29(5): 1 759~1 773.